

类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构设计及参数研究

周俊宏¹ 郦亮¹ 吴奕环¹ 黄毅¹ 刘震² 柳猷² 管攀峰³

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波; 2. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海;

3. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的: 类矩形无立柱盾构隧道适用于渡线段的应用, 施工过程中施作立柱, 在稳定阶段拆除立柱以达到最终运营稳定状态, 全过程中存在结构受力机制的变化。为了形成适用于类矩形无立柱隧道结构的设计方法并探究不同参数的影响, 有必要开展相关理论研究。方法: 明确了类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构在施工、运营全过程所受荷载状态; 基于修正惯用法(等效刚度均质环模型)建立设计模型, 探究了施工全过程及直接施加运营工况荷载 2 种不同工况下的结构响应, 并与足尺试验结果进行了对比验证。基于设计模型, 对侧压力系数、偏载值、结构埋深等多个关键因素开展了敏感性研究, 分析了对衬砌结构受力及变形的影响。结果及结论: 采用修正惯用法并直接施加最终运营阶段稳定荷载能满足类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构的工程设计要求, 但需要将设计值放大 5%~10%, 该结论也得到了足尺试验的支持。不同设计参数对结构响应的影响程度不同, 其中单侧偏载和结构埋深对于设计的影响更大, 同时进一步揭示了腰部负弯矩接头的薄弱特征。

关键词 类矩形盾构隧道渡线段; 无立柱结构; 结构设计; 关键设计参数; 敏感性分析

中图分类号 U451⁺.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.12.009

Design and Parameter Study of Pillarless Lining Structure for Quasi-rectangular Shield Tunnel

ZHOU Junhong, LI Liang, WU Yihuan, HUANG Yi, LIU Zhen, LIU Xian, GUAN Panfeng

Abstract Objective: The pillarless quasi-rectangular shield tunnels are suitable for application in crossover section. During the construction process, pillars are erected and then removed during the stabilization phase to achieve the final operational stable state. Throughout the entire process, there are changes in the structural force mechanism. To develop a design method applicable to pillarless quasi-rectangular shield tunnel structures and explore the influence of different parameters, it is necessary

to conduct relevant theoretical research. Method: The load states of the pillarless lining structure for quasi-rectangular shield tunnels during construction and operation process is clarified. Based on the modified conventional method (equivalent stiffness homogeneous ring model), a design model is established to investigate the structural response under two different working conditions: the entire construction process and the direct application of operating load conditions. A comparison and validation with full-scale test results are performed. Using the design model, a sensitivity study is conducted on several key factors such as lateral pressure coefficient, eccentric load value, and structure buried-depth, analyzing their impact on force and deformation conditions of lining structure. Result and Conclusion: The research findings show that using the modified conventional method and directly applying stable loads in the final operation stage can satisfy the engineering design requirements for pillarless lining structures in quasi-rectangular shield tunnels. However, it is recommended to amplify the design values by 5% to 10%, a conclusion supported by full-scale tests. Different design parameters have varying degrees of impact on structural response, with unilateral eccentric load and structure buried-depth exerting greater influence on the design, and the vulnerable characteristics of the negative bending moment joint at the waist are further revealed.

Key words quasi-rectangular shield tunnel crossover section; pillarless structure; structural design; key design parameter; sensitivity analysis

Author's address Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China

随着城市轨道交通的发展, 在城市核心区、人口密集和建筑物间距较窄的区域, 盾构隧道的建设愈发受到可利用地下空间的限制。因此, 寻求一种地下空间利用率高、对周边环境和建筑物影响低的施工方法也就愈发重要。类矩形盾构隧道作为一

种具有新型断面类型的盾构隧道,不仅空间利用率较高,且在受力性能方面也利用了圆形隧道的“拱效应”,故其在城市核心地区具有良好的适用性^[1]。20世纪80年代起,日本在地下工程建设高峰期,率先掀起了大断面异形盾构施工方法研究和应用的高潮^[2]。我国近年来类矩形、矩形和马蹄形等异形断面盾构隧道技术也得以迅猛发展^[3-4]。

城市轨道交通线路中,可设置渡线段以针对地铁车辆更换线路的需求。如日本京都市营地下铁东西线六地藏駅站北工区间渡线段即采用了大断面矩形无立柱盾构隧道结构,以满足车辆换线要求;其隧道断面尺寸为9 900 mm(宽)×6 500 mm(高),采用了厚度为500 mm的组合结构管片^[5]。而为满足轨道交通类矩形盾构隧道区间工程渡线段建设需求,我国也创新性地提出了类矩形盾构隧道无立柱结构形式,并针对该结构形式开展了相关试验及分析研究工作。但因类矩形无立柱结构的设计方法尚不清晰,故需对其开展设计方法研究以支撑类矩形无立柱盾构隧道结构的设计、生产和施工应用。

我国现有地下结构设计过程中一般将隧道设计模型分为4种,包括荷载-结构模型、地层-结构模型、经验类比模型和收敛-限制模型。各种设计模型或计算方法各有其适用场合,也有自身局限性。其中荷载-结构法中隧道衬砌结构的受荷模式清晰,计算较为简单,故而一般作为常规设计使用。在设计模型方面,梁-弹簧法是最为符合实际情况的计算方法,但是具体计算较为繁琐,需要编制较为复杂的程序。另外,隧道管片间螺栓旋转弹簧刚度、管片环间剪切弹簧刚度的取值也会对计算结果有一定影响。修正惯用法的计算方法简单,结果也比较符合实际,是一种比较实用的方法。日本对于一些大直径、大埋深的盾构隧道一般采用梁-弹簧法进行设计计算,而小型隧道则多用修正惯用法进行设计计算^[6-8]。

上述盾构隧道衬砌结构设计模型主要针对圆形盾构隧道,在设计分析及模型试验支撑下,已成功运用于带立柱类矩形典型隧道断面的衬砌结构受荷响应计算分析^[9-10]。而本文所研究的类矩形无立柱盾构隧道衬砌结构相比于有立柱结构其受力机制不同,设计方法尚不清晰,对设计关键参数敏感性也未进行探究。因而,有必要进一步开展类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构设计计算方法研究,

为后续的工程应用提供指导。

本研究拟对类矩形无立柱衬砌结构开展设计研究,探究结构设计和设计模型,并开展结构关键参数敏感性分析,以完善类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构的设计理论,为该无立柱结构的推广应用奠定基础。

1 类矩形盾构隧道无立柱结构设计

1.1 工程概况

类矩形盾构隧道无立柱结构的设计以宁波轨道交通2号线二期工程某区间为工程背景,其线路沿城区主干道铺设,周边用地以居住用地及商业用地为主。设计渡线段区间位于招宝山站站前,线路周边有小区、广场、银行等建筑物,所在位置管线及地下构筑物情况复杂,两侧既有建筑对于区间施工限制较多,空间较小,情况复杂。

根据地质详勘资料,区间隧道盾构出洞施工影响范围内的土层主要有:②2b层淤泥质黏土、②2c层淤泥质粉质黏土。渡线段隧道断面位于②2b层淤泥质黏土。隧道中心标高为-16.799 m,中心埋深为19.9 m,顶部覆土约为16.3 m。

1.2 设计工况

根据结构所处工程条件确定设计荷载,施工阶段采用水土合算,运营阶段采用水土分算,计算时考虑结构顶部和侧边水土荷载、基床反力、结构自重、注浆荷载、顶部偏载等荷载,运营阶段的设计荷载如图1所示。

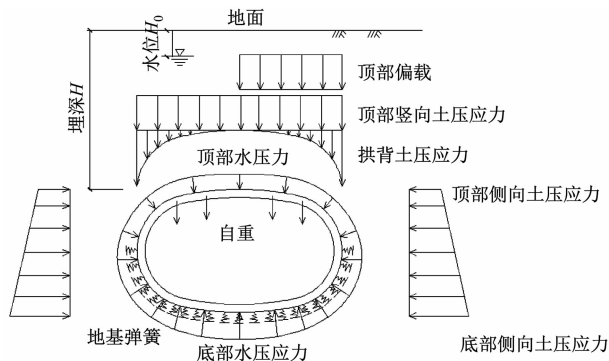


图1 类矩形盾构隧道无立柱结构运营阶段设计荷载分布模式
Fig. 1 Design load distribution mode of quasi-rectangular shield tunnel pillarless structure during operation stage

计算荷载的选取参考了双圆隧道结构设计及类矩形典型断面结构(有立柱)设计。考虑到异型断面结构与圆形隧道结构不一致,其对结构偏载旋

转更为敏感,故而仍需要考虑偏载产生的影响。

需要注意在衬砌结构脱出盾尾进行同步注浆时,为保证浆液能够从注浆管内顺利喷出,注浆浆液有一定的压力,即为同步注浆荷载,其与水土荷载同时作用在衬砌结构上。根据类矩形盾构实际注浆孔位布置设置注浆荷载,每个注浆孔的荷载分布采用等腰三角形分布,作用长度为 1 m,荷载最大处取管片顶部位置水土压力的 1.5 倍。其分布模式如图 2 所示。

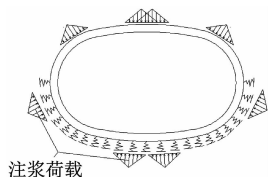
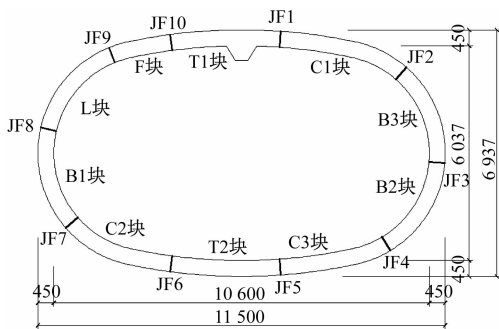


图2 同步注浆荷载分布模式

Fig. 2 Synchronous grouting load distribution mode

1.3 结构方案

类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构采用钢管片,其内径为 10 600 mm(宽)×6 037 mm(高),外径为 11 500 mm(宽)×6 937 mm(高)。整环管片由 10 块管片组成,包含 2 块 T 块、3 块 C 块、3 块 B 块、1 块 L 块和 1 块 F。管片结构厚度为 450 mm,环宽为 1 200 mm,钢管片内外弧面钢板厚为 30 mm。接头连接采用 10.9 级 M48 型螺栓和 10.9 级 M30 型螺栓连接。无立柱钢管片断面结构图如图 3 所示。



注:JF1—JF10 为管片接头编号;尺寸单位为 mm。

图3 无立柱管片断面结构图

Fig. 3 Cross-section structure diagram of pillarless segments

1.4 设计模型

考虑类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构为具有一定刚度的柔性结构,采用修正惯用法(等效刚度均质环模型)对结构进行设计计算,结构管片刚度折减系数取为 0.7。

隧道结构在实际施工过程中将依次经历施工

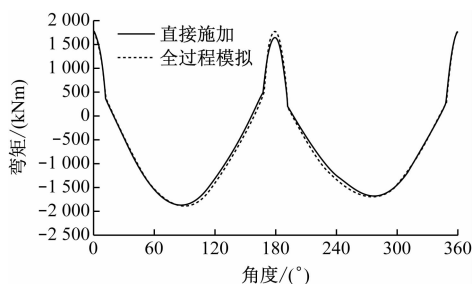
阶段同步注浆工况及运营阶段正常工况。为降低工程造价,保证结构安全,在施工阶段同步注浆工况下采用临时支撑以在高荷载水平下保护无立柱衬砌结构,随后在运营阶段再将临时支撑拆除。其计算全过程模拟分为如下 3 个阶段:

1) 施工阶段同步注浆工况。管片脱出盾尾,由无立柱管片和临时支撑共同承担施工同步注浆阶段外荷载。

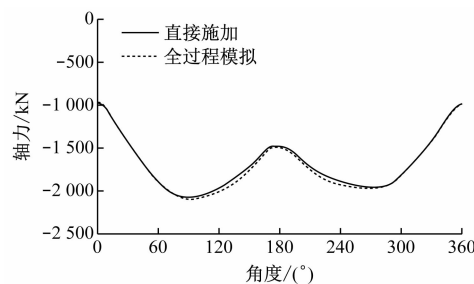
2) 施工阶段荷载稳定工况。待注浆荷载逐渐消散并且荷载稳定后,后期外部荷载不再发生改变。结构经历弹性卸载过程,由无立柱管片和临时立柱共同承担外部荷载。

3) 拆除临时支撑工况。拆除支撑时慢速平稳,可忽略结构动力响应;考虑结构与周围土体的相互作用,结构周边仅布置受压弹簧。

将 3 个阶段(全过程)的全量计算结果与直接施加最终运营阶段正常工况荷载的计算结果作内力对比,如图 4 所示。



a) 弯矩对比图



b) 轴力对比图

图4 施工全过程模拟和直接施加最终运营工况模拟的结构内力对比

Fig. 4 Comparison of structural internal forces between full process simulation and direct application simulation

由图 4 可知:计算结果显示两种方法的计算结果整体较为匹配,而 3 个阶段全过程模拟计算结果与直接施加最终运营工况模拟计算结果相比略高 5%~6%。由于充分考虑了施工过程土结相互作用,全过程模拟计算方法对结构在实际施工过程的

受荷性能模拟更为准确;而采用荷载直接施加计算方法,也能一定程度反映结构受荷性能。为便于工程应用,建议选用荷载直接施加计算方法,且在设计时将计算结果放大 5% -10% 为宜。

1.5 试验验证

对比类矩形无立柱结构足尺试验结果,采用修正惯用法对结构在试验荷载下的结构响应进行计算,结构短轴、长轴的收敛变形试验结果与模型计算结果汇总如表 1 所示。

表 1 结构收敛变形试验值与计算值对比
Tab.1 Comparison of experimental and calculated values for structural convergence deformation

位置	收敛变形		计算偏差率/%
	试验值/mm	计算值/mm	
短轴	-108.64	-108.69	+0.04
长轴	49.03	52.17	+6.40

注:短轴代表结构顶、底位置收敛变形,长轴代表左右腰部位置结构收敛变形;变形值为负代表结构向内收敛变形。

由表 1 可知:计算结果显示修正惯用法模型能有效计算结构的收敛变形;对短轴方向收敛变形的模拟较为精确,而对长轴方向变形的拟合效果相对可控。考虑到类矩形无立柱结构的设计受短轴收敛变形控制,故而在参数选取合理的情况下,修正惯用法可用于类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构的结构设计。

2 设计参数研究

盾构隧道设计中,结构的变形和内力均为重要的设计指标,本研究在隧道衬砌结构尺寸参数不变的基础上,采用修正惯用法(对应均质环模型)对结构进行设计参数研究。考虑到本研究重点关注不同参数对于结构的影响,且结构的节点设计仍有进一步调整优化空间,故而采用修正惯用法进行分析,取刚度折减系数为 0.7;主要分析侧压力系数、偏载和结构埋深等因素对衬砌结构受力及变形的影响。设计荷载模式与图 1 一致,采用水土分算方法。用于参数敏感性分析的 3 个设计参数的取值如表 2 所示。

2.1 侧压力系数

考虑到类矩形无立柱盾构隧道在实际应用过程中可能穿越多个地层,而在不同的工程中所处的土层性质不一,对应不同地层的侧压力系数一般是不同的,故采用设计模型分析时充分考虑侧压力系

数变化对于结构的影响。分别取侧压力系数为 0.40、0.50、0.54、0.60、0.70 进行计算分析,以顶、底及腰部控制截面和顶、底收敛变形为主要控制指标。通过上述计算结果反映侧压力系数变化对结构受荷响应的影响,计算得到的侧压力系数对衬砌结构响应(变形及控制截面内力)的影响如图 5 所示。

表 2 设计参数取值表
Tab.2 Design parameter value table

分析因素	侧压力系数	地面偏载/kPa	结构埋深/m
设计值	0.54	30	13
参数取值	0.40、0.50、0.54、0.60、0.70	0、15、30、45、60	5、10、13、15、20

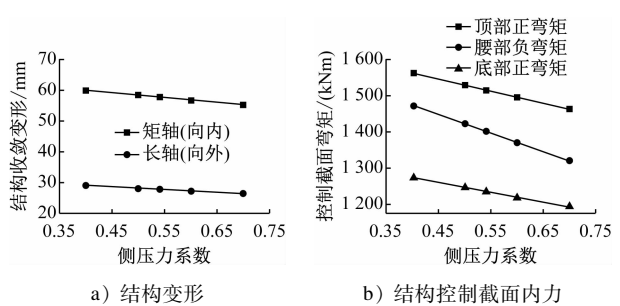


图 5 侧压力系数对结构响应影响
Fig.5 Influence of lateral pressure coefficient on structural responses

根据图 5 分析计算结果:土体水平侧压力系数从 0.7 降至 0.4 的过程中,衬砌结构的整体收敛变形量及控制截面内力值均逐渐增大;土体水平侧压力系数取为 0.4 时的计算工况相比土体水平侧压力系数取为 0.7 时的计算工况而言,衬砌结构长、短轴方向的收敛变形量增大了 8.1% ~ 10.6%,衬砌结构顶部及底部截面正弯矩值增大了 6.8% ~ 11.7%,而腰部截面负弯矩增大 21.8%。上述对比结果一方面说明随着土体水平侧压力系数的逐渐降低,即侧边卸载工况下,结构控制截面的弯矩和变形呈增大的趋势,结构受力趋于不利;另一方面说明,当侧边卸载时,控制指标中对侧压力变化最为敏感的是腰部负弯矩。同时,对比足尺试验结果可知,腰部负弯矩接头的内力较正弯矩接头大,因此腰部负弯矩区域在设计中需重点关注。

2.2 地面偏载

所述的地面偏载即单侧顶部偏载,选取右侧偏载为 0、15 kPa、30 kPa、45 kPa 和 60 kPa 等 5 个工况进行影响分析,计算得到的偏载(结构右侧偏载量)

对衬砌结构响应的影响如图 6 所示。

根据图 6 的计算结果可知:随着结构从无偏载直至单侧偏载(右侧)增大至 60 kPa,管片的整体收敛变形量以及控制截面内力值均呈增大趋势,且整体呈现线性相关性;相较于无偏载工况,衬砌结构在右侧偏载 60 kPa 时,短轴、长轴方向的收敛变形量增长了 12.5%~12.8%,结构顶、底正弯矩值增长了 12.2%~12.4%,结构右侧腰部负弯矩上升了 27.8%,但左侧腰部负弯矩下降了 1.8%。这说明偏载对于结构内力以及变形的影响主要集中于偏载一侧,对于偏载另一侧结构而言则起到一定的有利作用。同时,根据计算结果可知,单侧偏载对于偏载一侧的衬砌结构内力和变形发展非常不利,尤其是提升了偏载侧衬砌结构腰部管片负弯矩及接头内力,使腰部位置的受荷响应偏于不利。设计时,需考虑单侧偏载对衬砌结构带来的不利影响,尤其应考虑腰部管片和接头的抗弯承载能力问题。

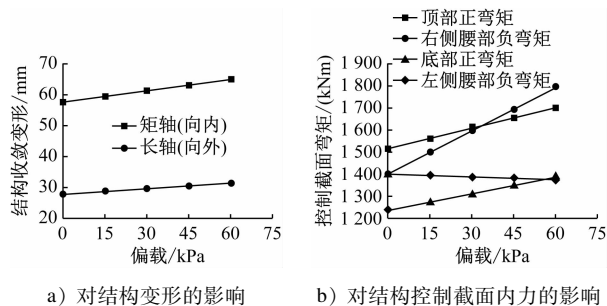


图 6 偏载对结构响应的影响

Fig. 6 Influence of eccentric load on structural response

2.3 结构埋深

隧道结构的埋深一般会随着线路而发生变化,且在不同工程中结构的埋深也不同。为研究结构在不同埋深条件下的适用性,分析结构对顶部埋深的变化敏感性是十分有必要的。分别取隧道埋深为 5 m、10 m、13 m、15 m 和 20 m 进行计算,研究结构变形和控制截面弯矩随结构埋深的变化规律,计算得到的结构顶部埋深对衬砌结构响应的影响如图 7 所示。

由图 7 的计算结果可知:结构埋深对于无立柱结构的影响较大,随着埋深从 5 m 上升至 20 m,结构的收敛变形及内力都有大幅度变化。与 13 m 埋深下的结构响应作比较,在 20 m 埋深下,结构变形普遍升高了 47.9%~48.3%,结构内力值升高了 47.1%~48.5%;在 5 m 埋深下,结构变形下降了 54.7%~55.2%,结构内力升高值下降了 53.8%~

55.4%。可见随着埋深的变化,结构的整体响应的变化基本保持相近的升降比例,且普遍比较敏感,埋深的增加对于结构而言也是偏不利的,因此需要结合实际工程背景,对管片进行针对性设计。对比单侧偏载分析结果可知:同等埋深增长条件下,偏载对结构的影响更为不利,尤其表现在偏载侧腰部管片的负弯矩控制内力增幅显著。

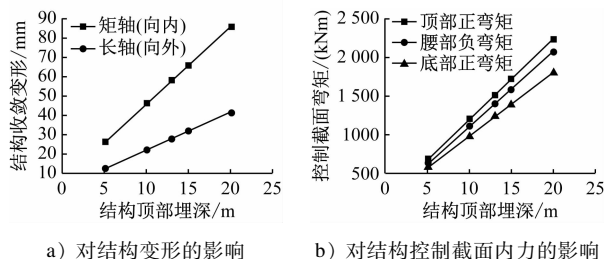


图 7 结构埋深对结构受荷响应的影响

Fig. 7 Influence of structural buried-depth on structural load response

3 结语

本研究对类矩形盾构隧道无立柱钢衬砌结构开展了设计研究,采用修正惯用法对荷载直接施加和全过程模拟 2 种不同计算方法进行了对比,通过足尺试验验证了修正惯用法的适用性,并开展了结构关键设计参数敏感性分析,得到如下成果:

- 1) 开展了类矩形盾构隧道无立柱钢衬砌结构设计研究,形成了设计计算方法和设计模型。
- 2) 采用修正惯用法对类矩形盾构隧道无立柱钢衬砌结构的实际施工过程进行设计时,施工全过程模拟计算方法的计算结果更为可靠,若采用运营工况荷载直接施加计算方法,设计结果应放大 5%~10%,以保证结构安全。
- 3) 足尺试验验证了修正惯用法能用于模拟类矩形无立柱结构的受荷响应,计算结果可满足工程设计要求。

4) 根据参数敏感性分析结果,类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构对单侧偏载和结构埋深更为敏感。随着单侧偏载提升至 60 kPa,偏载侧衬砌结构腰部负弯矩管片及接头均处于不利状态,对应负弯矩提高近 30%。结构响应基本和埋深呈现线性关系,随着埋深从 13 m 增大至 20 m,结构变形和内力也普遍提高近 50%。

5) 类矩形盾构隧道无立柱钢衬砌结构的薄弱位置为腰部负弯矩管片及接头,设计时考虑运维期

结构面对偏载、地面堆载或侧边卸载等意外工况时,应特别关注腰部负弯矩区域的结构安全储备。

参考文献

- [1] 朱瑶宏,朱雁飞,黄德中,等. 类矩形盾构法隧道技术的开发与应用[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(增刊1): 1.
ZHU Yaohong, ZHU Yanfei, HUANG Dezhong, et al. Development and application of the technical system for quasi-rectangular shield tunneling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(S1): 1.
- [2] SONODA T, HAGIWARA H, OSAKI H, et al. Construction of underground space by a new shield tunnelling method: spiral tunnelling and ramification of multi-circular face shield[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1992, 7(4): 355.
- [3] 孙巍,官林星,温竹茵. 大断面矩形盾构法隧道的受力分析与工程应用[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 1028.
SUN Wei, GUAN Linxing, WEN Zhuyin. Mechanical analysis and application of large rectangular cross-section shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(10): 1028.
- [4] 薛广记,董艳萍,范磊,等. 超大断面马蹄形盾构盾体系统研究设计及应用[J]. 隧道建设, 2017, 37(9): 1179.
XUE Guangji, DONG Yanping, FAN Lei, et al. Design and application of shield system of large cross-section horseshoe-shaped shield[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(9): 1179.
- [5] NAKAMURA M, HIROSAWA N, YAMAGUCHI T, et al. New mechanical joint segment tunnel lining system[J]. Nippon Steel Technical Report: Overseas, 1998 (77/78): 40.
- [6] 袁金荣,周裕倩,刘学增,等. 双圆盾构隧道衬砌结构设计及参数研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 638.
YUAN Jinrong, ZHOU Yuqian, LIU Xuezheng, et al. Structural design of lining and parameter analysis for DOT shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 638.
- [7] 汤漩,黄宏伟. 盾构隧道衬砌设计中几个问题的研究[J]. 地下空间, 2003(2): 210.
TANG Xuan, HUANG Hongwei. A study on several key topics of shield tunnel lining design[J]. Underground Space, 2003(2): 210.
- [8] 张美聪. 圆形盾构隧道衬砌管片的计算分析[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(5): 23.
ZHANG Meicong. Analysis of lining segments for circular shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(5): 23.
- [9] 叶宇航,柳献,刘震,等. 类矩形盾构隧道衬砌结构设计模型研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(6): 1187.
YE Yuhang, LIU Xian, LIU Zhen, et al. Study on design model of quasi-rectangular shield tunnel linings[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(6): 1187.
- [10] LIU X, YE Y, LIU Z, et al. Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: first results from full-scale ring tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 440.

(收稿日期:2021-06-18)

《城市轨道交通研究》被英国 EuroPub 数据库收录

2023 年 10 月 31 日,《城市轨道交通研究》被英国 EuroPub 数据库收录。这是先后被 DOAJ(Directory of Open Access Journals,开放存取期刊目录)、Ulrich's Periodicals Directory(乌利希国际期刊指南)和 ICI Journal Master List(哥白尼精选数据库)收录后,《城市轨道交通研究》被收录的第 4 个国际知名数据库。

EuroPub 是注册于英国的一个综合性、多用途的大型数据库,旨在提高开放获取学术期刊的知名度,从而促进其使用率和影响力的增加。目前收录 27858 本活跃、权威期刊的索引记录,其中大部分期刊同时被 PubMed、Web of Science、Scopus 索引。EuroPub 数据库现有来自世界各地期刊中 697430 篇文章,覆盖 186 家世界各地的出版商。

《城市轨道交通研究》被四大国际知名数据库收录,标志着《城市轨道交通研究》的期刊学术质量和所遵循的出版规范得到了国际权威数据库的认可,是期刊发展的重要里程碑。同时,也意味着《城市轨道交通研究》在创建国内和国际一流学术期刊建设工程上又向前迈进了一步。衷心感谢广大作者、读者、审稿专家及编审人员的辛勤耕耘与奉献,《城市轨道交通研究》将不忘初心,砥砺前行,全力推进专业化、精品化和国际化的发展战略,进一步加强期刊学术质量建设,扩大期刊传播范围,提升期刊国际影响力。

(《城市轨道交通研究》编辑部报道)